

Zur „zweiten“ Grenzflächenviskosität

Untersuchungen

an Öl/Wasser- und Öl/Öl-Systemen

Hans Friedrich Rußler

1961

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Zur "zweiten" Grenzflächenviskosität
Untersuchungen an Öl/Wasser- und Öl/Öl-Systemen.

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt
von
Hans Friedrich Rußler
aus
Gauting

Januar 1961



1. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. B. STUKE
 2. Berichterstatter: Prof. Dr. G. M. SCHWAB
- Tag der mündlichen Prüfung: 22. FEB. 1961

Diese Arbeit wurde in der Zeit vom August 1958 bis Dezember 1959 am Physikalisch-Chemischen Institut der Universität München angefertigt.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Priv.-Doz. Dr. B. Stuke, danke ich hiermit für die Anleitung zu dieser Arbeit, für die freundliche Unterstützung in allen damit zusammenhängenden Problemen und für die lebenswürdige Atmosphäre, welche die Zusammenarbeit für mich sehr angenehm machte.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. G. M. Schwab, dem Vorstand des Physikalisch-Chemischen Instituts, für die mir gegebene Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Institut durchzuführen, und für das mir gewährte Stipendium.

Inhaltsverzeichnis

=====

	Seite
Einleitung	1
Problemstellung	5
Versuchsanordnung	6
Beschreibung des Meßgefäßes	6
Beschreibung der photographischen	
Einrichtung	6
Beschreibung des elektronischen	
Blitzgerätes	8
Beschreibung des Thermostaten	10
Versuchsdurchführung	10
Herstellung der Versuchsflüssigkeiten ...	13
Messung der Dichte, Zähigkeit, Grenzflä-	
chenspannung	13
Fehlerbetrachtung	13
Fehlerfortpflanzung	15
V Versuchsergebnisse	17
Acetophenon	18
Nitromethan	21
Cyclohexanon	21
Amylalkohol	21
Cyclohexanol	24
Paraffinöl/Nitromethan, Benzylalkohol,	
Acetophenon	26
Diskussion	29
Literaturverzeichnis	36

Einleitung

Beim Fließen von Flüssigkeiten sind zwei Zähigkeiten von Bedeutung:

1. Die Scherzähigkeit (wenn Verwechslungen ausgeschlossen sind, einfach als Zähigkeit bezeichnet),
2. Die sog. "zweite" Zähigkeit (auch Volumenzähigkeit genannt), die mit der Energiedissipation bei Kompressions- bzw. Dilatationsvorgängen verbunden ist.

Bei normalen Flüssigkeiten (geringe Kompressibilität) genügt die Scherzähigkeit zur Beschreibung des Flüssigkeitsverhaltens. Nur unter extremen Bedingungen (z. B. Ultraschall) muß auch die zweite Zähigkeit berücksichtigt werden.

Beide Zähigkeiten haben ihr Analogon beim Grenzflächenfließverhalten. Die Grenzflächenscherzähigkeit beschreibt das Grenzflächenfließverhalten, bei der die Grenzfläche erhalten bleibt und nur die Form geändert wird (Scherung der Flüssigkeitsfäden in der Grenzfläche). Die Wirkung der zweiten Grenzflächenzähigkeit ist mit Grenzflächenkompression bzw. -dilatation, d. h. Verschwinden bzw. Neubildung von Grenzfläche, verbunden. Im Gegensatz zum Fließverhalten im Flüssigkeitsinneren spielt bei den meisten Grenzflächenfließvorgängen die zweite Grenzflächenzähigkeit gegenüber der Grenzflächenscherzähigkeit die wesentlichere Rolle (z. B. schwingender Strahl, schwingender Tropfen, Oberflächenwellen u.s.w.), d.h. der Grenzflächenanteil an der Energiedissipation wird wesentlich durch die zweite Grenzflächenzähigkeit bestimmt. Die Grenzflächenscherzähigkeit ist für Grenzflächenfilme grenzflächenaktiver Substanzen oft gemessen worden, z.B. mittels der Dämpfung einer in der Grenzfläche oszillierenden kreisrunden Platte ¹⁾. Demgegenüber gibt es fast keine Daten für die zweite Grenzflächenzähigkeit. - Als erster hat A. KLEMM ²⁾ einen Wert für die zweite Oberflächenzähigkeit von Wasser aus der kataphoretischen Wanderungsgeschwindigkeit von Luftblasen in Wasser bestimmt ($\epsilon = 10^{-4}$ Poise $\cdot$ cm). Später hat J. SIENKNECHT ³⁾ die stationäre Fallgeschwindigkeit von Flüssigkeitstropfen in Butanol/Wasser-Systemen zur Bestimmung der zweiten

Grenzflächenzähigkeit benutzt. (Für die Systeme n Butanol/Wasser und sec. Butanol/Wasser wurde eine Grenzflächenzähigkeit $\epsilon = 2 \cdot 10^{-4}$ Poise · cm gefunden.) SIENKNECHT ging dazu von einer von BOUSSINESQ⁴⁾ gegebenen Erweiterung des STOKES'schen Gesetzes für die stationäre Bewegung von Flüssigkeitstropfen aus.

$$\frac{W}{\text{Boussinesq}} = W_{\text{Stokes}} \frac{\epsilon + r(2\eta + 3\eta')}{\epsilon + r(3\eta + 3\eta')} \quad (1)$$

W = Reibungswiderstand, ϵ = zweite Grenzflächenzähigkeit, r = Tropfenradius, η, η' = Scherzähigkeit der Tropfenflüssigkeit bzw. des Fallmediums.

Ebenso wie bei der STOKES'schen Gleichung ist dabei die Vernachlässigbarkeit der Trägheitskräfte vorausgesetzt, d.h. die Gleichung gilt nur für Re (REYNOLDS'sche Zahl) $\ll 1$

Tropfen können sich nur dann gemäß dem STOKES'schen Zusammenhang bewegen, wenn die dafür wesentliche Voraussetzung: starre Kugel mit adhärrierender Grenzschicht, erfüllt ist. Für derartige Tropfen (die bei $Re \ll 1$ unter der Wirkung der Oberflächenspannung immer hinreichend Kugelform besitzen) bedeutet dies das Vorhandensein einer starren, bei der Bewegung mitwandernden Grenzflächenschicht. Dieses Verhalten setzt voraus, daß in der Grenzfläche Kräfte wirksam sind, die diese gegen den Einfluß der Scherkräfte des umgebenden Mediums, die die Grenzfläche auf der Vorderseite des Tropfens aufreißen und auf der Rückseite zusammenschieben wollen, zusammenhalten. Im Grenzfall ver-

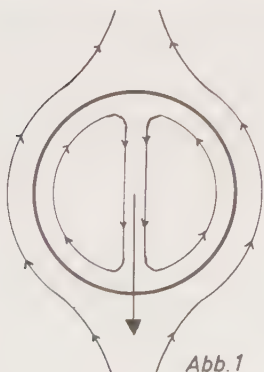


Abb. 1

hält sich die Grenzflächenschicht elastisch. - Im allgemeinen wird sich die Grenzschicht unter dem Einfluß der an ihr wirkenden Kräfte jedoch plastisch verformen, d.h. fließen. Dann findet Impulsübertragung auf das Tropfeninnere statt. Im Tropfen stellt sich dabei eine Zirkulationsbewegung ein (siehe Abb. 1). Im Grenzfall kann sog. NEWTON'sches Fließen der Grenzfläche vorliegen, d.h. zwischen

der Dilatationsgeschwindigkeit $\dot{\Theta}$ der Oberfläche und der sich einstellenden Spannung $\Delta\sigma$ besteht Proportionalität:

$$\Delta\sigma = \epsilon \dot{\Theta} \quad (2)$$

mit ϵ der zweiten Grenzflächenzähigkeit als deformationsgeschwindigkeits- und spannungsunabhängigen Proportionalitätsfaktor. Bei dem beschriebenen Fließen der Kugelgrenzfläche handelt es sich um reine Grenzflächendilatation bzw. -kompression; Scherungsanteile brauchen also nicht berücksichtigt zu werden. Das ist der von BOUSSINESQ behandelte, zu Gleichung (1) führende Fall.

Aus Gleichung (1) folgt unter Berücksichtigung der Schwere als treibender Kraft

$$v = \frac{2g(\rho' - \rho)r^2}{9\eta} \cdot \frac{\epsilon + r(3\eta + 3\eta')}{\epsilon + r(2\eta + 3\eta')} \quad (3)$$

mit v Steig- bzw. Fallgeschwindigkeit; ρ, ρ' Dichte der Tropfenflüssigkeit bzw. des umgebenden Mediums. Das Verhältnis der wirklichen Tropfengeschwindigkeit zu derjenigen, die der Tropfen haben würde, wenn er sich unter sonst gleichen Bedingungen nach STOKES bewegen würde, ergibt sich damit zu

$$\frac{v}{v_{\text{Stokes}}} = \frac{\epsilon + r(3\eta + 3\eta')}{\epsilon + r(2\eta + 3\eta')} \quad (4)$$

Für $\epsilon \rightarrow 0$ oder $3r(\eta + \eta') \gg \epsilon$ d.h. Vernachlässigbarkeit des in der Grenzfläche selbst liegenden Widerstandes, gehen die Gleichungen (1), (3) und (4) in diejenigen für das vor BOUSSINESQ von HADAMARD und RYBCZYNSKI⁵⁾ behandelte Problem über. Für $\epsilon \gg 3r(\eta + \eta')$, also auch bei $r \rightarrow 0$, oder für $\eta \gg \eta'$ gehen die Gleichungen (1) und (3) in die entsprechenden STOKES'schen über. Gleichung (4) mit $\epsilon = 0$ einerseits und die STOKES'sche Gleichung andererseits geben also die obere bzw. untere Grenze für die Geschwindigkeit kugelförmiger Tropfen bei $Re \ll 1$ an.

Unter stark vereinfachenden Voraussetzungen (Beschränkung auf einen Relaxationsprozeß) gilt folgende Beziehung zwischen einer Zähigkeit ϵ , dem zugehörigen elastischen Modul und der entsprechenden Relaxationszeit τ

$$\epsilon = \alpha \tau \quad (5)$$

Bei Kenntnis von Zähigkeit und elastischem Modul lässt sich demzufolge die Größenordnung der für das Abklingen der zugehörigen elastischen Spannungen charakteristischen Relaxationszeit angeben.

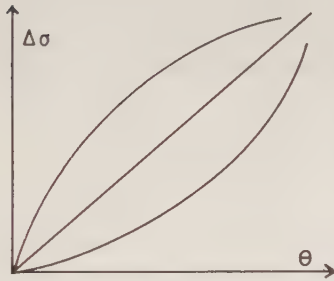


Abb2

Für NEWTON'sches Fließverhalten gilt gemäß dessen Definition (Gleichung (2)) die Gerade in Abb.2, in der die Deformationsspannung gegen die zugehörige Deformationsgeschwindigkeit $\Delta\sigma$ aufgetragen ist. Die gekrümmten Kurven zeigen nichtnewton'sches Fließverhalten an. In diesen Fällen existiert keine Zähigkeit, d.h. keine von der deformierenden Spannung unab-

hängige Proportionalitätskonstante zwischen Spannung und Deformationsgeschwindigkeit.

Problemstellung

Durch Messung der stationären Fallgeschwindigkeit von Tropfen in einer mit der Tropfensubstanz nicht mischbaren Flüssigkeit soll das Fließverhalten von Flüssigkeit/Flüssigkeit-Grenzflächen untersucht und bei geeigneten Systemen die zweite Grenzflächenzähigkeit bestimmt werden.

Versuchsanordnung

Abb. 3 gibt den schematischen Aufbau der im wesentlichen bereits von SIENKNECHT benutzten Versuchsanordnung wieder. Sie besteht aus dem Meßgefäß, der photographischen Einrichtung, dem elektronischen Blitzgerät und einem Thermostaten.

Beschreibung des Meßgefäßes

Das Meßrohr (Durchmesser 5,4 cm, Länge 48 cm) ist von einem Temperiermantel umgeben. Mittels eines Schliffes ist ein Glasbecher aufgesetzt. Becher und Meßrohr sind durch ein zentrisch angeordnetes, 8 mm weites Glasrohr verbunden. Dieses Rohr nimmt den im Becher erzeugten Tropfen auf und führt ihn in die Achse des Meßrohres, 10 cm oberhalb der ersten Meßmarke, ein. Seitlich versetzt ist am Becherboden nach unten ein Glasstab angeschmolzen, der im Abstand von 180 mm zwei Schleifen aus Platindraht (Meßmarken der Meßstrecke) besitzt. Diese ermöglichen eine paralaxenfreie Beobachtung des Tropfendurchgangs. Auf der Höhe des unteren Platindrahtes hat das Meßgefäß einen durch den Temperiermantel hindurchgeführten, mit einer planparallelen Glasplatte verschlossenen Tubus, der die Tropfen zur Durchmesserbestimmung zu photographieren gestattet. An der Glaswand des Meßgefäßes sind an der Vorder- und Hinterseite in Höhe der unteren Meßmarke zwei von hinten beleuchtete senkrechte Schlitzblenden angebracht. So werden nur diejenigen Tropfen erfaßt, die in die Schärfeebene des Objektives fallen.

Beschreibung der photographischen Einrichtung

Diese besteht aus einem Leica-Gehäuse, Modell Ig, mit Spiegelreflexkasten zur Scharfeinstellung, und einem Auszug von insgesamt 893 mm, mit einem Tessar 12 cm als Objektiv. Zur leichteren Justierung ist die ganze Anordnung auf eine optische Bank montiert. Die Verschlußauslösung - und damit über die Synchronleitung auch die Blitzauslösung - erfolgt durch Hand mittels einer Morsetaste über ein 24-Volt-Relais und einen Leitz-Magnetauslöser, wie aus Abb. 1 ersichtlich.

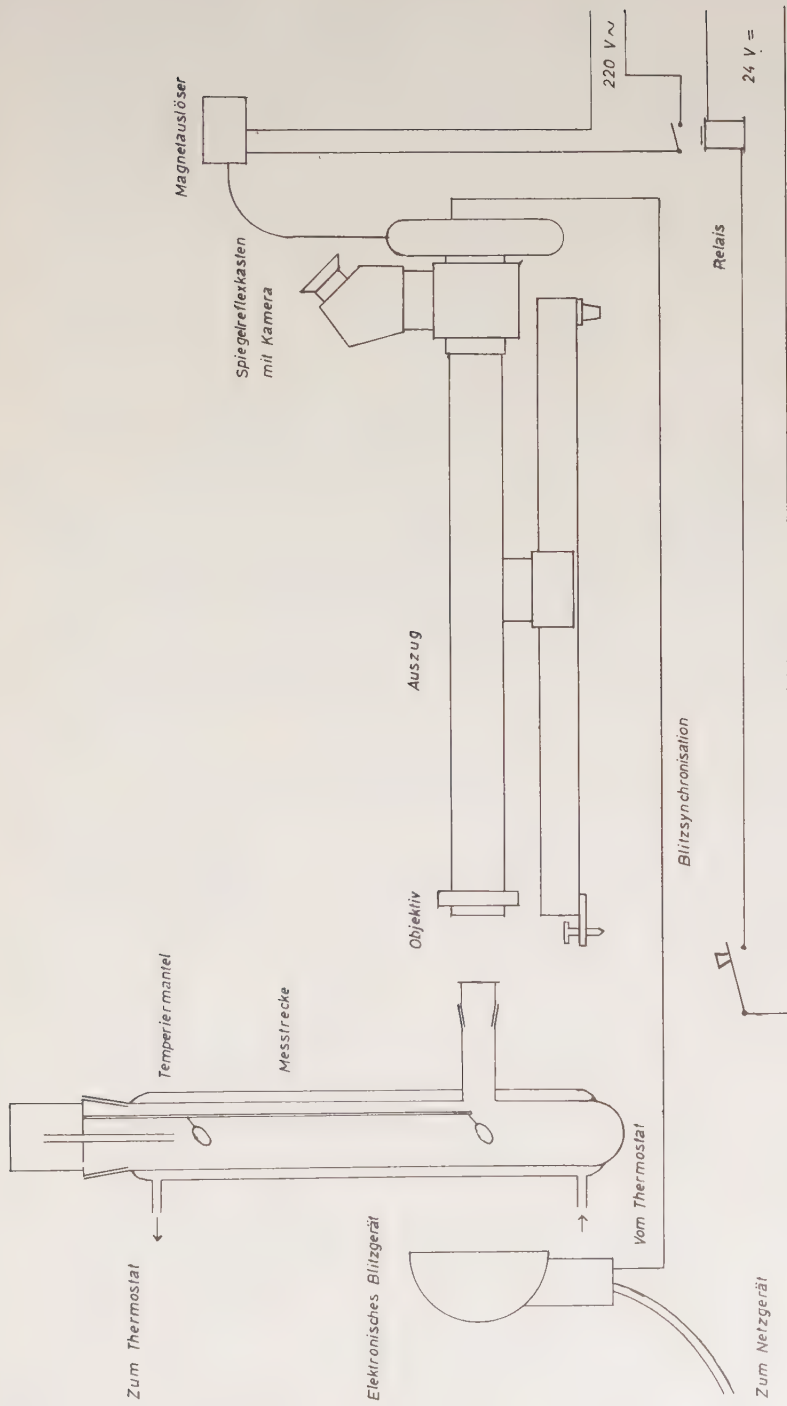


Abb.3 Schema der Versuchsanordnung.

Beschreibung des elektronischen Blitzgerätes

Zur Erzeugung hinreichend lichtstarker und kurzzeitiger Blitze wurde das in Abb. 4 dargestellte Hochspannungs-Blitzgerät gebaut. Durch einen Netztransformator wird eine Wechselspannung von 1,8 kV erzeugt, die mit einer Gleichrichterröhre (DCG 1/250) gleichgerichtet wird. Über einen Strombegrenzungswiderstand von 10 KOhm werden wahlweise 1 bis 3 Bosch-MP-Kondensatoren von je 40 MF auf 2,5 kV aufgeladen. Der zweite Widerstand von 10 KOhm, der mit einem Schalter parallel zu den Kondensatoren liegt, dient zu deren Entladung. An einem Spannungsteiler (6,2 MOhm/300 KOhm) liegt einerseits - mit einem 500-KOhm-Potentiometer zur Einstellung der Zündspannung - eine Anzeigeglimmlampe, andererseits ein Kondensator von 0,25 MF, der über die Primärwicklung des Zündtransformators durch den Synchronkontakt entladen wird. Der an der Sekundärseite entstehende Spannungsimpuls zündet seinerseits durch Stoßionisation die unter Spannung stehende Blitzlampe (Philips 103 730). Nach einer empirischen Formel ⁶⁾

$$t = K \frac{C^{0,69}}{V^{0,625}}$$

wobei C = Farad	K = Konstante = 14,5
V = Volt	(hängt etwas von der Definition
t = Sekunden	der Blitzdauer ab)

bedeuten.

Unter Verwendung obiger Daten berechnet sich die Blitzzeit bei Entladung eines 40-MF-Kondensators

$$t = 14,5 \frac{(40 \cdot 10^{-6})^{0,69}}{2500^{0,625}} \approx 0,0001 \text{ [sec.]}$$

Bei Hinzuschalten eines zweiten bzw. eines dritten Kondensators ergeben sich folgende Blitzzeiten:

80 MF	ca. 0,0005 sec.
120 MF	ca. 0,001 sec.

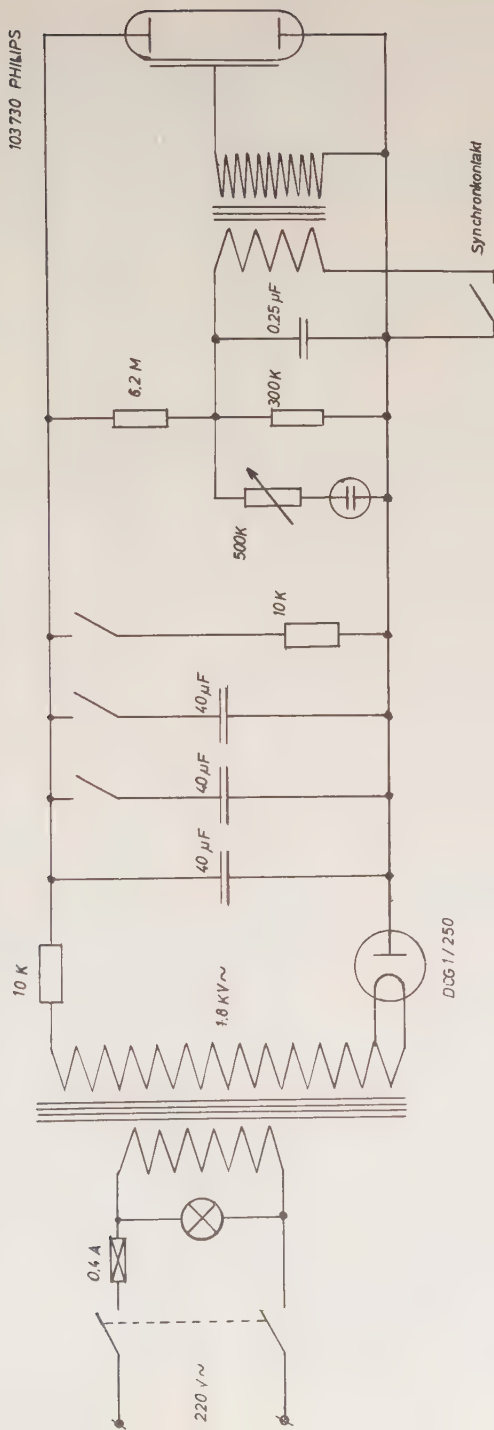


Abb.4 Schaltungsschema des Blitzgerätes

Beschreibung des Thermostaten

Zur Temperierung wurde ein üblicher, in zwei Punkten abgeänderter Thermostat benutzt:

1. Elektrolytische Heizung statt Tauchsieder, da diese praktisch keine Wärmekapazität besitzt und nahezu trägheitslos arbeitet;
2. Leistungslose Schaltung am Kontaktthermometer mit Hilfe eines Tyratrons (PL 21), zur Gewährleistung exakter und kontaktschonender Schaltvorgänge.

Versuchsdurchführung

Die im Thermostaten auf Versuchstemperatur gebrachte Versuchsflüssigkeit wurde in das bereits eine Stunde vom Thermostaten temperierte Versuchsgefäß gebracht. Erst nach weiteren 4 Stunden Temperierung begannen die Messungen. Die gleichmässige Temperierung wurde in Vorversuchen mit eingebrachten Schwebeteilchen geprüft. Konvektion war nicht wahrnehmbar. Auch ein Beckmann-Thermometer zeigte keine Temperaturschwankungen. Die Tropfen wurden in dem auf das Meßgefäß aufgesetzten Becher, der mit dem jeweiligen Fallmedium gefüllt war, durch schlenkernde Bewegung einer mit der Tropfenflüssigkeit gefüllten Pipette erzeugt. Von den dabei entstandenen Tropfen wurde ein geeigneter jeweils zur Öffnung des Zentrierrohres dirigiert, der dann durch das Meßrohr fiel. Der Durchgang durch die Meßmarken wurde mittels einer Stoppuhr von Hand gestoppt und an der unteren Meßmarke zugleich die Kamera ausgelöst. Für alle Aufnahmen wurde KB 14 Film von Adox benutzt und auf Kontrast entwickelt. Beim Blitzgerät war nur 1 Kondensator von 40 MF eingeschaltet. Das entspricht einer Leistung von 125 Watt-Sec. und der kürzesten mit diesem Gerät erreichbaren Blitzdauer. Versuche zeigten, daß sich bei Verwendung eines Blaufilters eine größere Schärfe der Aufnahmen erzielen ließ. Dieses wurde daher in allen Fällen verwendet. Der entwickelte Film wurde unter einem Mikroskop mit Okularteilung (diese war durch Vergleichsaufnahmen geeicht) bei zehnfacher Vergrößerung ausgemessen. Die Abb. 5, 6, 7 und 8 zeigen Tropfenaufnahmen für verschiedene Durchmesser.

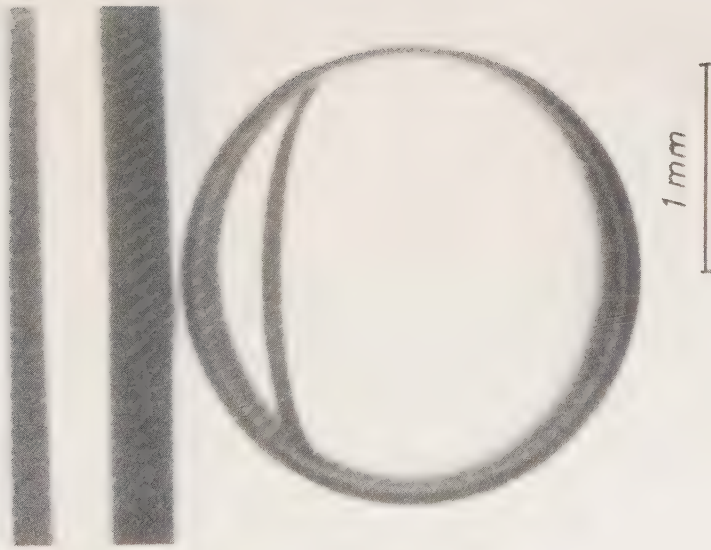


Abb. 5 Nitromethanthropfen ($d=2,24$ mm)
in Paraffinöl.

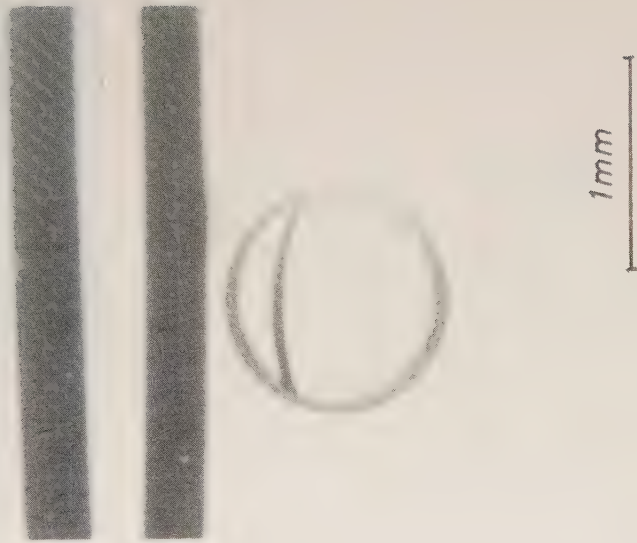


Abb. 6 Nitromethanthropfen ($d=1,20$ mm)
in Paraffinöl.

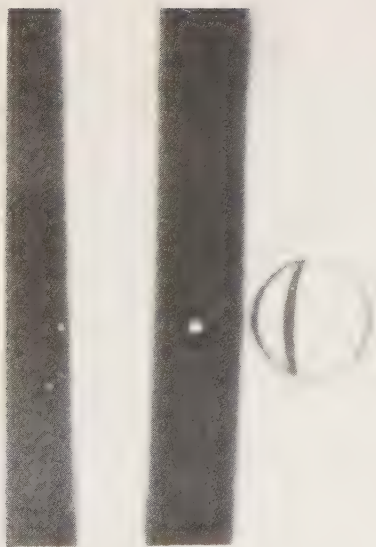


Abb. 7 Nitromethantropfen ($d=0,58$ mm)
in Paraffinöl.



Abb. 8 Tropfen von 0,1 n Schwefel-
säure ($d=0,38$ mm) in Cyclo-
hexanol.

Herstellung der Versuchsflüssigkeiten

Als Ausgangssubstanzen wurden Flüssigkeiten vom höchsten käuflichen Reinheitsgrad verwendet, die - wenn hinreichend flüchtig - nochmals im Vakuum mit Widmer-Kolonnen destilliert worden waren. Das verwendete Wasser war in einer Quarzapparatur zweimal destilliert. Beide Phasen des jeweiligen Systems wurden zunächst sorgfältig im Thermostaten (12 Stunden) bei der Versuchstemperatur gegenseitig gesättigt. Das Versuchsgesäß sowie die verwendeten Vorratsflaschen wurden jeweils mit Chrom-Schwefelsäure und bidestilliertem Wasser gereinigt. Diese Sorgfalt ist notwendig, da geringe Mengen grenzflächenaktiver Substanzen das Grenzflächenfließverhalten wesentlich verändern können. 7)

Messung der Dichte, Zähigkeit, Grenzflächenspannung

Die Flüssigkeitsdichten wurden mittels eines im Thermostaten auf Versuchstemperaturen gebrachten Pyknometers bestimmt. Die Messung der Zähigkeit der dünnflüssigen Phasen erfolgte in einem mit Temperiermantel umgebenen OSTWALD'schen Kapillarviskosimeter bei der Versuchstemperatur. Bei den zäheren Flüssigkeiten wurde ein ebenfalls temperierbares HÖPLER-Kugelfall-Viskosimeter benutzt.

Die Grenzflächenspannung wurde mit einem Stalagmometer bestimmt. Die jeweils gefundenen Werte stimmten, soweit Literaturwerte ⁸⁾ vorhanden sind, sehr gut mit diesen überein.

Fehlerbetrachtung

1. Radiusbestimmung:

Zur Ermittlung des Abbildungsfehlers wurden 2 Glaskapillaren, deren Durchmesser mikroskopisch gemessen war, in einer der Versuchsflüssigkeiten (Cyclohexanol) unter den selben Bedingungen wie die Tropfen photographiert

a) in der Schärfeebene,

b) jeweils 1 mm)

c) jeweils 2 mm) vor bzw. hinter der Schärfeebene (Abb.9A und B)

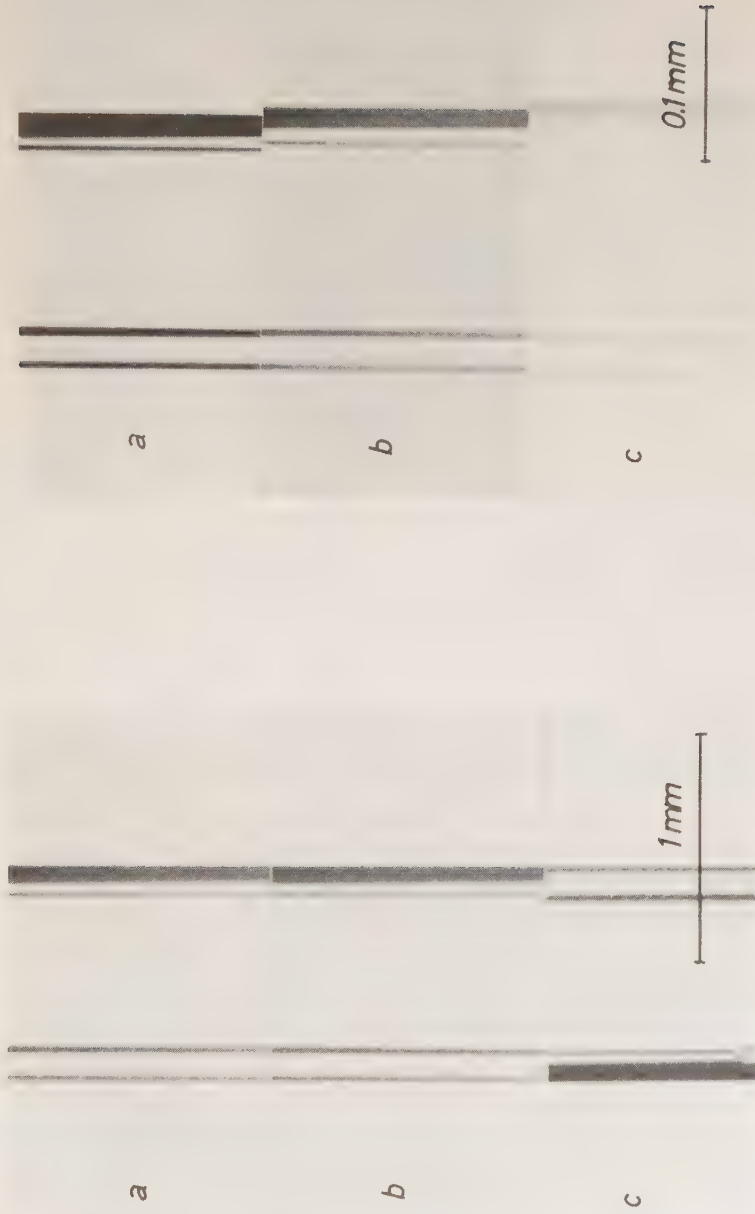


Abb. 9A

Photographische Aufnahmen von Glaskapillaren (A: Durchmesser 0,915 mm, Abb. 9B
B: 0,166 mm) in Cyclohexanol. Aufgenommen a: in der Schärfeebene,
b: 1 mm vor und c: 2 mm vor der Schärfeebene.

Direkt mikroskopisch gemessener Durchmesser:

1. Kapillare 0,915 mm $\emptyset$ 2. Kapillare 0,166 mm $\emptyset$

Aus den Aufnahmen ermittelte Durchmesser:

In der Schärfe-		Fehler		Fehler
ebene	0,915 mm $\emptyset$	0	%	0,163 mm $\emptyset$ -1,8 %
1 mm davor	0,917 mm $\emptyset$	+0,21	%	0,178 mm $\emptyset$ +7,2 %
1 mm dahinter	0,917 mm $\emptyset$	+0,21	%	0,178 mm $\emptyset$ +7,2 %
2 mm davor	0,920 mm $\emptyset$	+0,55	%	0,185 mm $\emptyset$ +11,5 %
2 mm dahinter	0,920 mm $\emptyset$	+0,55	%	0,185 mm $\emptyset$ +11,5 %

Wegen der an der Versuchsanordnung angebrachten Schlitzblende (siehe Seite 6) kamen nur Abweichungen von 1 mm in Betracht. Für mittelgroße Tropfen (Durchmesser 0,9 mm) bedeutet das einen Fehler von höchstens 0,3 %. Zu den kleinsten gemessenen Tropfen hin (Durchmesser 0,2 mm) kann sich der Fehler allerdings bis zu 7 % steigern.

2. Geschwindigkeitsbestimmung:

Die Länge der Meßstrecke ließ sich mit einer Schublehre hinreichend genau festlegen, so daß nur ein subjektiver Fehler bei der Bestimmung des Tropfendurchganges an den Meßmarken berücksichtigt werden mußte. Dieser konnte maximal die Größe des Tropfendurchmessers haben. Bei den größten untersuchten Tropfen, Durchmesser 3 mm, bedeutet dies bei der 180 mm langen Meßstrecke 1,5 %. Stoppfehler liegen bei einiger Übung unter 0,05 Sekunden. Bei der kürzesten Fallzeit von 8 Sekunden macht dieser Fehler höchstens 0,6 % aus.

3. Fehler in den Stoffdaten:

Der Fehler bei einer Dichtemessung ist wegen der großen Meßgenauigkeit bei Wägungen so klein, daß auch etwaige Fehler in den Dichtedifferenzen zwischen Tropfenflüssigkeit und Fallmedium gegenüber den anderen Fehlern vernachlässigt werden können. Bei den Zähigkeitsmessungen mit dem OSTWALD'schen und HÖPLER'schen Viskosimeter lassen sich Ergebnisse bis auf 1,5 % Genauigkeit erreichen.

Fehlerfortpflanzung

Gleichung (3) nach ϵ aufgelöst lautet:

$$\epsilon = r\eta \left[\frac{1}{1-\alpha} - 3(1+\eta/\eta) \right] \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{2gr^2\Delta\rho}{9\eta v} \quad (6)$$

$$\text{wobei } \frac{\eta/\eta + 2/3}{\eta/\eta + 1} < \alpha < 1 \text{ sein muß.} \quad (6a)$$

a) Betrachtet man zunächst $\epsilon = \epsilon(\eta/\eta)$, so gilt

$$\frac{|\delta \epsilon|}{\epsilon} = 3 r \eta' \frac{|d(\eta'/\eta)|}{\eta'/\eta} \quad (7)$$

d. h. der relative Fehler in ϵ abhängig vom relativen Fehler in η'/η wächst proportional mit η' . Die Zähigkeit der Tropfenflüssigkeit sollte also klein sein; das bedeutet für ein gegebenes System: die weniger zähe Phase sollte sich in der zäheren bewegen.

b) Gemäß der vorangehenden Diskussion sind die Größen r, η, ν als fehlerbehaftet anzusehen. Bei Benutzung des totalen Differentials zur Bestimmung der Fehlerfortpflanzung ergibt sich

$$f_{\epsilon} = \frac{r \eta}{\epsilon} \left\{ \left[\frac{1+\alpha}{(1-\alpha)^2} - 3(1+\eta'/\eta) \right] f_r + \left[\frac{2\alpha-1}{(1-\alpha)^2} + 3 \right] f_{\eta} + \frac{\alpha}{(1-\alpha)^2} f_{\nu} + 3\eta'/\eta f_{\eta'} \right\} \quad (8)$$

wobei $f_{\epsilon}, f_r, f_{\eta}, f_{\nu}$ die Absolutwerte der jeweiligen relativen bzw. prozentualen Fehler bedeuten sollen.

Da wegen Beziehung (6a) $(1-\alpha)^2 \ll 1$ ist (Maximalwert: $(1-\alpha)_{\max}^2 = 1/9$) bestimmen die Glieder mit $(1-\alpha)^2$ im Nenner wesentlich den Fehler- einfluß auf ϵ . Unter Vernachlässigung der übrigen Glieder (η'/η sollte höchstens von der Größenordnung 1 sein, weil andernfalls α gemäß (6a) nahe an 1 rückt; siehe auch a)) folgt

$$f_{\epsilon} = \frac{r \eta}{\epsilon (1-\alpha)^2} \left\{ (\alpha+1) f_r + (2\alpha-1) f_{\eta} + \alpha f_{\nu} \right\} = \frac{(\alpha+1) f_r + (2\alpha-1) f_{\eta} + \alpha f_{\nu}}{(1-\alpha) [1-3(1-\alpha)/(1+\eta'/\eta)]} \quad (9)$$

f_{ϵ} als Funktion von α betrachtet ($\eta'/\eta = \text{const}$) hat einen Minimalwert für

$$\alpha_{\min} = A + \sqrt{B + A^2} \quad \text{mit } A = \frac{f_{\eta} - f_r}{f_r + 2f_{\eta} + f_{\nu}} \quad \text{und } B = \frac{3f_r + f_{\nu}}{f_r + 2f_{\eta} + f_{\nu}} - \frac{2f_r + f_{\eta} + f_{\nu}}{3(1 + \eta'/\eta)(f_r + 2f_{\eta} + f_{\nu})} \quad (10)$$

Nimmt man zur Vereinfachung $f_r \approx f_{\nu} \approx f_{\eta}$ an, so geht (10) über in

$$\alpha_{\min} = \sqrt{\frac{2+3\eta'/\eta}{3(1+\eta'/\eta)}} \quad (11)$$

Versuchsergebnisse

In der vorstehend beschriebenen Apparatur wurden folgende, gegenseitig gesättigte Systeme untersucht:

Acetophenon/Wasser

0,1 n Schwefelsäure

0,1 n Natronlauge

stark verdünnte Netzmittellösung (Mirasol)

Nitromethan/Wasser

0,1 n Schwefelsäure

Cyclohexanon/Wasser

0,1 n Schwefelsäure

Amylalkohol/Wasser

0,1 n Schwefelsäure

Cyclohexanol/Wasser

0,1 n Schwefelsäure

Paraffinöl/Nitromethan

Benzylalkohol

Acetophenon

Auswahlgesichtspunkte waren:

1. Unterschiedliche Grenzflächenspannung der reinen Zweistoffsysteme. - Bei den Öl/Wasser-Systemen stuft sich die Grenzflächenspannung ziemlich gleichmässig zwischen 3 und 12 dyn/cm, bei den Paraffinöl-Systemen zwischen 1,4 und 13,7 dyn/cm.
2. Geeignete Dichteunterschiede zwischen den jeweiligen Phasen eines Systems, so daß nach Möglichkeit die weniger zähe Phase in der zäheren fiel. - Gemäß Gleichung (4) darf die Zähigkeit der Tropfenflüssigkeit gegenüber der des Fallmediums nicht zu groß sein, wenn die Abweichungen von der Bewegung starrer Tropfen hinreichend hervortreten sollen.

Alle Messungen wurden bei 25° C durchgeführt.

Der Untersuchungsbereich war zu kleinen Tropfen hin (unterhalb 0,3 mm Durchmesser) durch unsichere Beobachtungsmöglichkeit (insbesondere bei Phasen sehr ähnlichen Brechungsindexen) und ungenaue Radiusbestimmung begrenzt, zu großen Tropfen hin durch die Abplattung bei der Bewegung. (Aus Gründen der Vergleichbarkeit waren nur hin-

reichend kugelförmige Tropfen von Interesse.)

Die Meßergebnisse sind in üblicher Weise in dimensionsloser Form, $\log W$ gegen $\log Re$, dargestellt:

$$W = \frac{8r\Delta p g}{3\rho v^2} \quad \text{Widerstandszahl} \quad Re = \frac{2rpv}{\eta} \quad \text{Reynoldssche Zahl}$$

In diesen Diagrammen gilt die oberste ausgezogene Kurve für die Bewegung starrer Kugeln. Die Abweichungen nach unten zeigen das Ausmaß der Mitbewegung des Tropfeninneren und damit das Fließen der Grenzfläche an. Die unterste Kurve bezieht sich auf den Fall fehlenden Grenzflächenwiderstandes, Gleichung (3) mit $\epsilon = 0$ (in den Abb. 10, 11, 12, 13, 14 und 16 über den eigentlichen Gültigkeitsbereich, $Re < 1$, hinaus extrapoliert), und stellt die untere Schranke für den möglichen Kurvenverlauf dar.

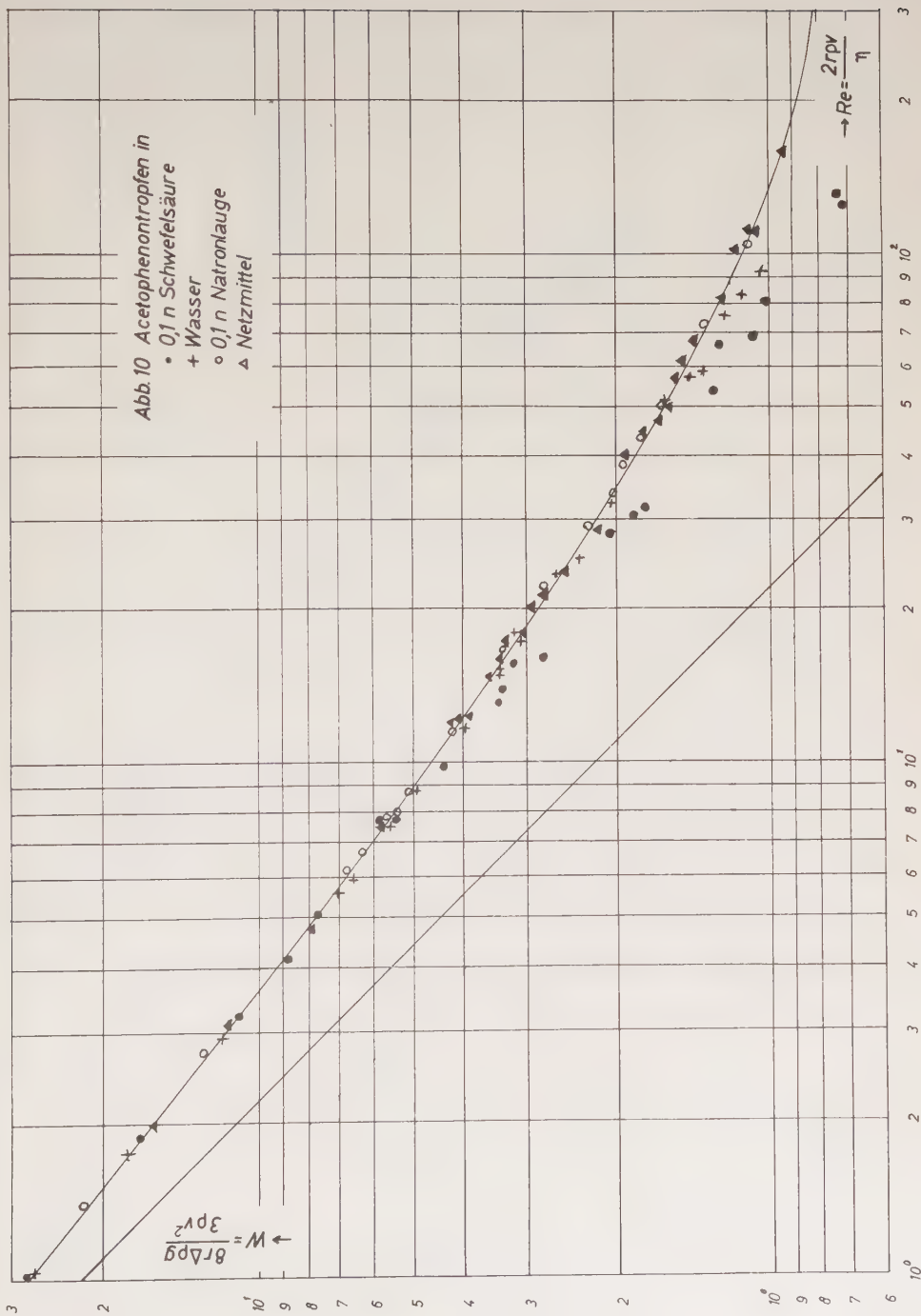
Acetophenon

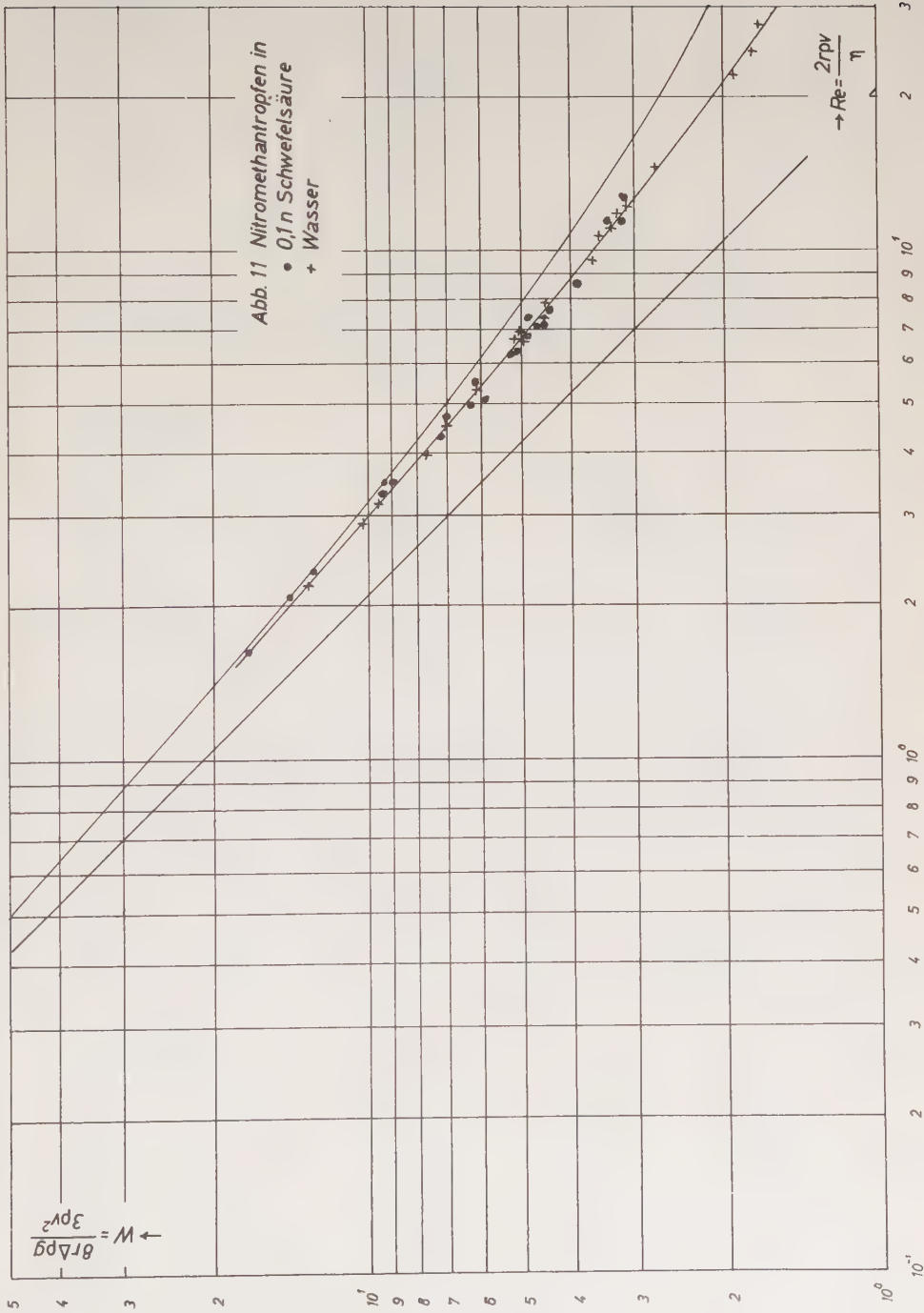
Gemessene Materialdaten:

	ρ [g/cm ³]	$\Delta\rho$ [g/cm ³]	η [cP]
Acetophenon	1,0238		1,61
0,1 n Schwefelsäure	1,0003	0,0235	0,90
Acetophenon	1,0229		1,60
Wässrige Phase	0,9974	0,0255	0,90
Acetophenon	1,0229		1,59
0,1 n Natronlauge	1,0012	0,0217	0,90
Acetophenon	1,0245		1,58
Netzmittel	0,9972	0,0273	0,84

Grenzflächenspannung γ in allen Fällen 12 dyn/cm.

Abb. 10 zeigt, daß sich die Tropfen im Bereich kleiner REYNOLDS'scher Zahlen bei allen Systemen wie starre Kugeln verhalten. Erst bei $Re = 10$ im sauren und bei $Re = 60$ im neutralen Medium tritt eine merkliche Abweichung von der Kurve der starren Tropfen auf. In der Netzmittellösung und in der 0,1 n Natronlauge bleiben die Tropfen im ganzen untersuchten Bereich starr.





Nitromethan

Gemessene Materialdaten:

	ρ [g/cm ³]	$\Delta\rho$ [g/cm ³]	η [cP]
Nitromethan	1,1287		0,75
Wässerige Phase	1,0175	0,1112	0,92
Nitromethan	1,1241		0,71
0,1 n Schwefelsäure	1,0114	0,1126	0,92

Grenzflächenspannung γ in beiden Fällen 0,5 dyn/cm.

Hier, Abb. 11, liegen die Meßpunkte für saures und neutrales Medium auf einer Kurve, die sich ab $Re = 2$ von der der starren Kugeln zunehmend entfernt.

Cyclohexanon

Gemessene Materialdaten:

	ρ [g/cm ³]	$\Delta\rho$ [g/cm ³]	η [cP]
Cyclohexanon-Phase	0,9457		1,71
0,1 n Schwefelsäure	0,9962	0,0504	1,01
Cyclohexanon	0,9458		1,77
Wässerige Phase	0,9939	0,0580	1,07

Grenzflächenspannung γ in beiden Fällen 7,8 dyn/cm.

Abb. 12 zeigt, daß nur die Daten für die saure Lösung von der Kurve für starre Kugeln abweichen. Da diese Abweichungen in den Bereich $Re < 1$ hineinreichen, ließen sich hier Werte für die Grenzflächenzähigkeit ϵ gemäß Gleichung (6) ausrechnen:

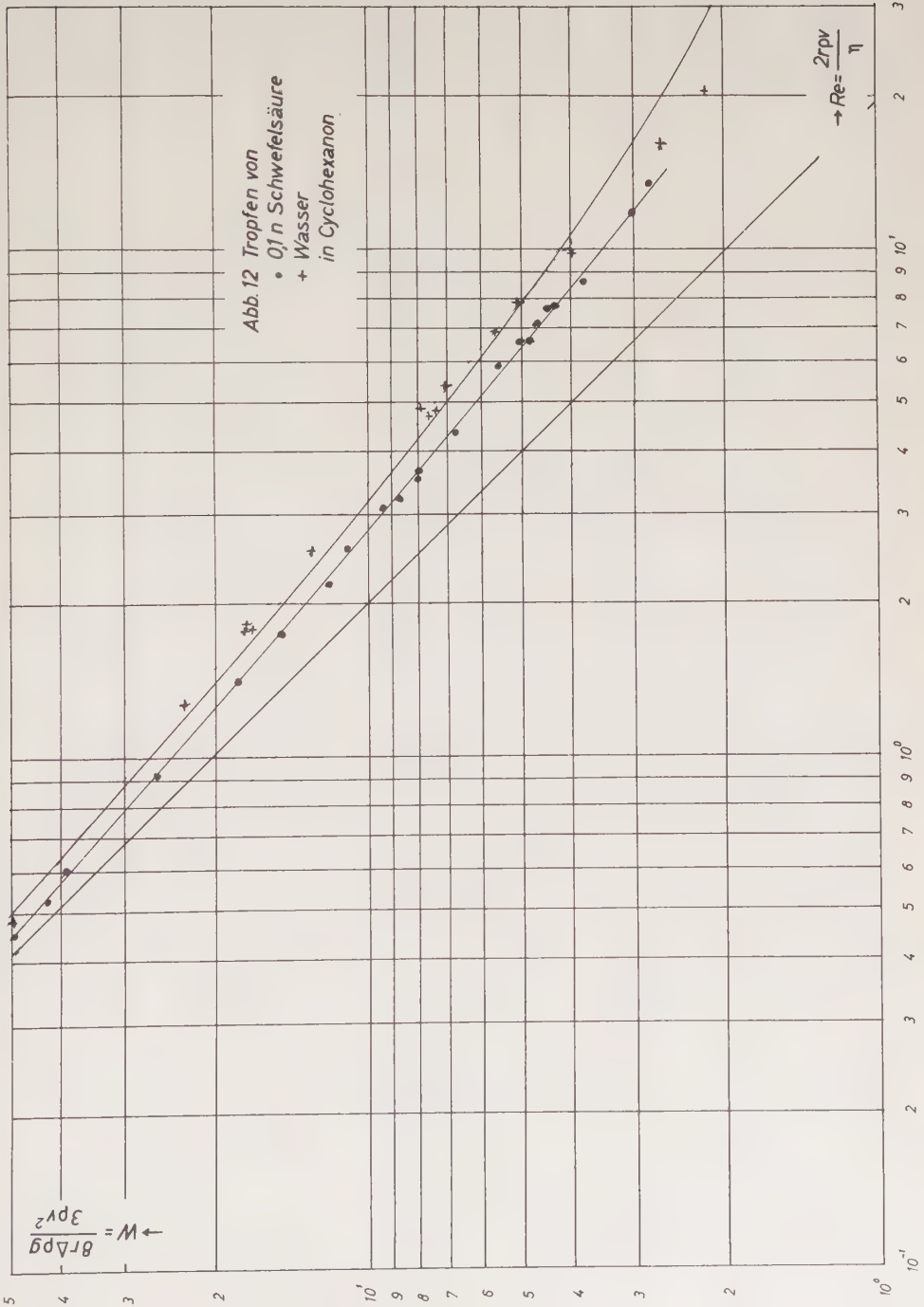
r [cm]	v [cm/sec]	Re	W	ϵ [Poise·cm]
0,017	0,200	0,374	59,3	$2,5 \cdot 10^{-3}$
0,0193	0,250	0,520	43,0	$6,0 \cdot 10^{-3}$

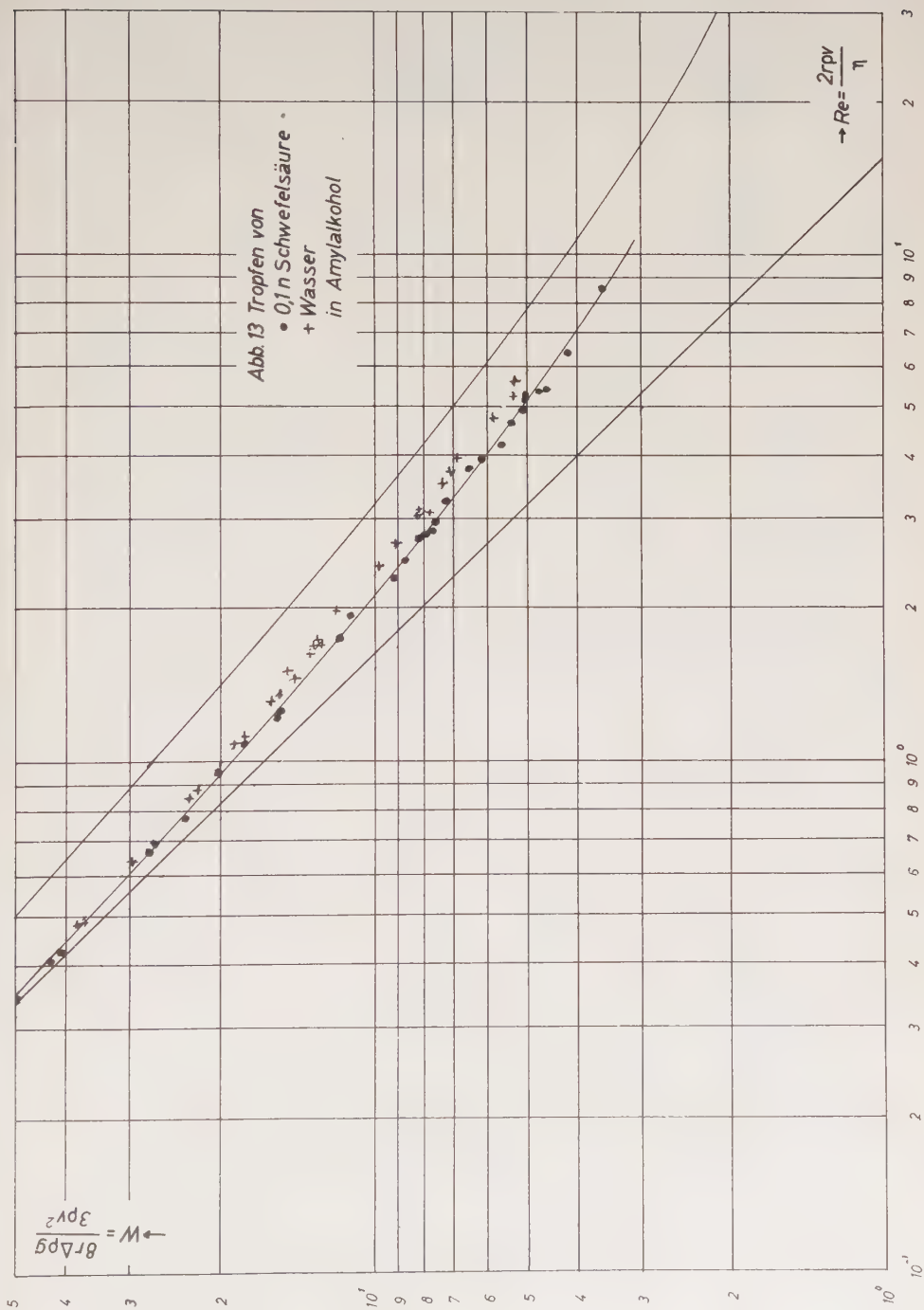
Amylalkohol

Gemessene Materialdaten:

	ρ [g/cm ³]	$\Delta\rho$ [g/cm ³]	η [cP]
Amylalkohol	0,8202		2,98
Wässerige Phase	0,9931	0,1729	0,91
Amylalkohol	0,8229		3,00
0,1 n Schwefelsäure	0,9971	0,1741	0,95

Grenzflächenspannung γ in beiden Fällen 4,8 dyn/cm.





Beide Meßreihen, Abb. 13, zeigen starke Zirkulationsbewegung im Tropfen an. Die Werte für die neutrale Lösung liegen etwas über denen für die saure Lösung. Für $Re < 1$ wurden wiederum Werte für die Grenzflächenzähigkeit ϵ berechnet.

r [cm]	v [cm/sec]	Re	W	ϵ [Poise·cm]
0,0163	0,464	0,413	41,7	$1,8 \cdot 10^{-3}$
0,0159	0,467	0,406	40,3	$4 \cdot 10^{-3}$

Cyclohexanol

Gemessene Materialdaten:

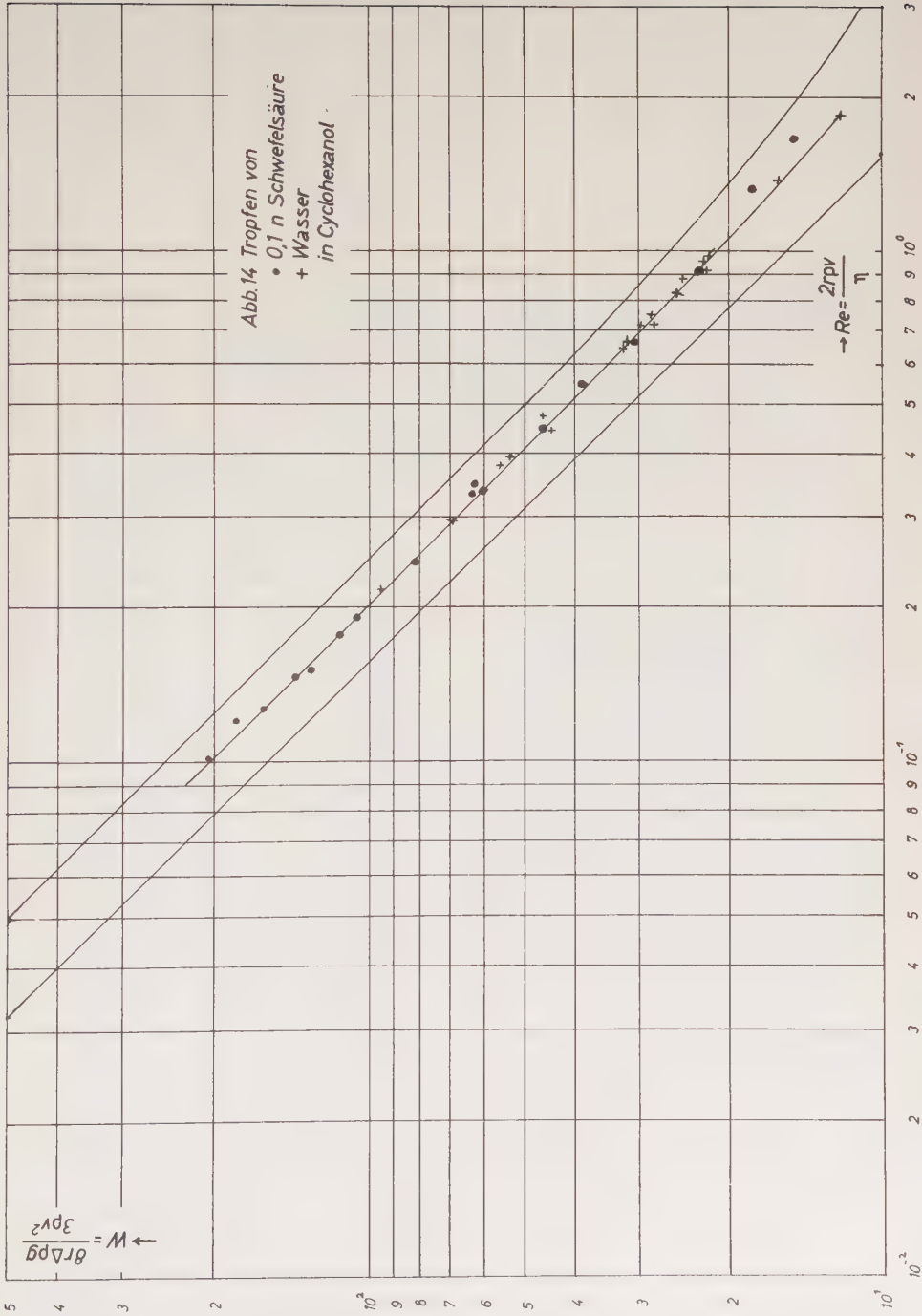
	ρ [g/cm ³]	$\Delta\rho$ [g/cm ³]	η [cP] ⁺
Cyclohexanol-Phase	0,9469		15,28
0,1 n Schwefelsäure	0,9954	0,0485	1,00
Cyclohexanol-Phase	0,9484		14,94
Wässrige Phase	0,9965	0,0480	0,98

Grenzflächenspannung γ für beide Systeme 3,1 dyn/cm.

Abb. 14 zeigt das Zusammenfallen beider Meßreihen und den Unterschied zur Bewegung starrer Tropfen. Da hier nahezu alle Daten im Bereich $Re < 1$ liegen, wurden für mehrere Meßpunkte ϵ Werte berechnet:

r [cm]	v [cm/sec]	Re	W	ϵ [Poise·cm]
0,0485	0,177	0,106	208	$6,8 \cdot 10^{-2}$
0,0503	0,189	0,123	188	$6,0 \cdot 10^{-2}$
0,05075	0,202	0,127	166	$4,1 \cdot 10^{-2}$
0,05325	0,227	0,149	138	$3,3 \cdot 10^{-2}$
0,05855	0,266	0,193	111	$5,4 \cdot 10^{-2}$

⁺) Da die für die wassergesättigte Cyclohexanol-Phase gefundene Viscosität von der für reines Cyclohexanol stark abweicht, wurde die Abhängigkeit der Viscosität vom Wassergehalt des Cyclohexanols bestimmt (Abb. 15). - Der starke Zähigkeitsabfall bei kleinen Wasserkonzentrationen ist offenbar auf den Abbau größerer, durch Wasserstoffbrückenbindungen zusammengehaltener Cyclohexanolkomplexe durch das Wasser zurückzuführen, das seinerseits Wasserstoffbrücken mit dem Cyclohexanol bildet.



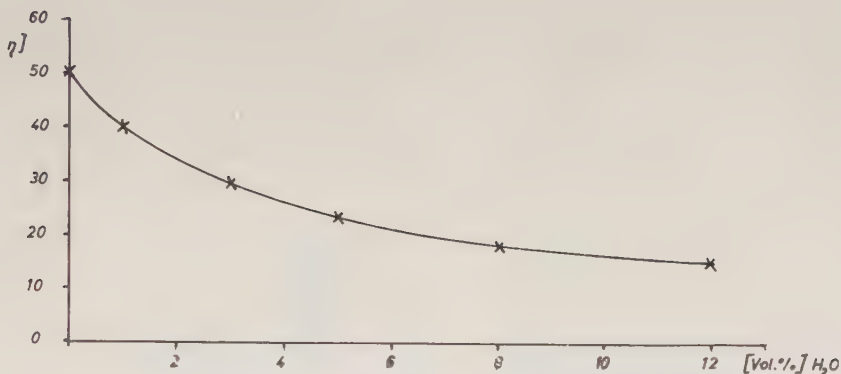


Abb. 15 Abhängigkeit der Zähigkeit des Cyclohexanols vom Wassergehalt.

Paraffinöl/Nitromethan

Paraffinöl/Benzylalkohol

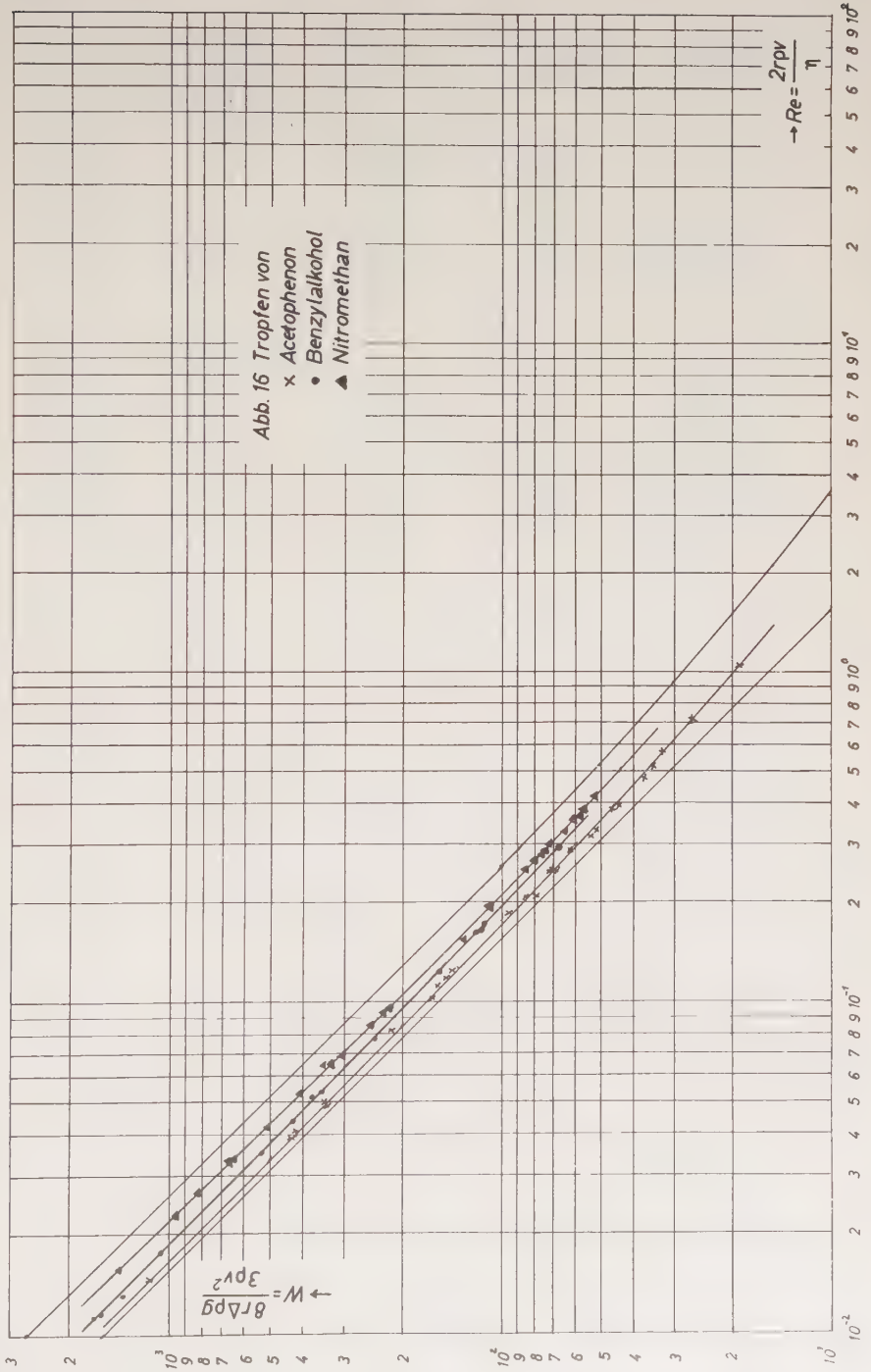
Paraffinöl/Acetophenon

Gemessene Materialdaten:

	ρ [g/cm ³]	$\Delta\rho$ [g/cm ³]	η [cP]	γ [dyn/cm]
Paraffinöl	0,8785		124,9	
Nitromethan	1,1779	0,2994	0,782	13,7
Paraffinöl	0,8792		112,1	
Benzylalkohol	1,0378	0,1586	4,68	4,0
Paraffinöl	0,8940		27,5	
Acetophenon	1,0094	0,1153	1,65	1,4

Aus Abb. 16 ersieht man, daß die Zirkulationsbewegung in den Tropfen vom Nitromethan über den Benzylalkohol zum Acetophenon hin zunimmt, d.h. der Grenzflächenwiderstand nimmt in dieser Reihenfolge ab.

x [cm]	v [cm/sec]	Re	W	ϵ [Poise·cm]
Paraffinöl/Nitromethan				
0,0647	0,2425	0,022	978	$6,18 \cdot 10^{-1}$
0,0797	0,374	0,0419	506	$7,5 \cdot 10^{-1}$
0,0898	0,49	0,0616	333	$4,6 \cdot 10^{-1}$
0,127	1,01	0,18	111	$4,73 \cdot 10^{-1}$
0,147	1,30	0,268	77,5	$8,0 \cdot 10^{-1}$



r [cm]	v [cm/sec]	Re	W	ϵ [Poise·cm]
Paraffinöl/Benzylalkohol				
0,057	0,129	0,0115	1614	$0,66 \cdot 10^{-1}$
0,089	0,31	0,0434	436	$1,25 \cdot 10^{-1}$
0,128	0,62	0,125	156	$2,17 \cdot 10^{-1}$
0,1407	0,755	0,1674	116,1	$2,65 \cdot 10^{-1}$
0,168	1,08	0,286	67,5	$2,99 \cdot 10^{-1}$
Paraffinöl/Acetophenon				
0,0308	0,0957	0,014	1135	$0,952 \cdot 10^{-3}$
0,0459	0,21	0,0476	352	$2,89 \cdot 10^{-3}$
0,0471	0,213	0,0496	350	$8,43 \cdot 10^{-3}$
0,0623	0,364	0,112	158,8	$16,6 \cdot 10^{-3}$
0,086	0,677	0,288	63,5	$32,1 \cdot 10^{-3}$

Diskussion

a) Einfluß der Wasserstoffionenkonzentration auf das Grenzflächenfließverhalten.

Versuche von SCHWINDT ⁹⁾ hatten ergeben, daß das Fließverhalten von Wasser/Öl und Wasser/Luft-Grenzflächen in der Umgebung des Neutralpunktes stark mit der Wasserstoffionenkonzentration in der wässrigen Phase ansteigen sollte.

Abb. 10 der vorliegenden Arbeit zeigt ein entsprechendes Verhalten für das System Acetophenon/Wasser. Bei der alkalischen Lösung liegen die Meßpunkte im ganzen untersuchten Bereich auf der Kurve für starre Kugeln (ebenso wie die Punkte für die Netzmittellösung, bei der dieses Verhalten wegen des Vorhandenseins eines Grenzflächenfilmes aus grenzflächenaktiver Substanz zu erwarten ist; die Daten wurden gemessen, um die Festkugelkurve zu verifizieren). Die Punkte der neutralen Lösung zweigen für höhere REYNOLDS'sche Zahlen von der Festkugelkurve ab. Recht ausgeprägt ist das Abzweigen der Punkte für die saure Lösung. Auch der Abb. 12 (Cyclohexanon/Wasser) ist ein entsprechender Unterschied zwischen neutraler und saurer Lösung zu entnehmen, ebenso - wenn auch schwächer - der Abb. 13 (Amylalkohol/Wasser).

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse für die Systeme Nitromethan/Wasser (Abb. 11) und Cyclohexanol/Wasser (Abb. 14). Hier weichen die Punkte für saure und neutrale Lösung in gleicher Weise von der Festkugelkurve ab (alkalische Systeme wurden außer bei Acetophenon/Wasser nicht untersucht, da bei diesen beim gegenseitigen Sättigen der Phasen sehr beständige Emulsionen entstehen.). - Inzwischen hat SCHMITLER ¹⁰⁾ zeigen können, daß die SCHWINDT'schen Ergebnisse für Wasser/Luft-Grenzflächen auf das Vorhandensein geringster Mengen kapillaraktiver Verunreinigungen (z. B. 10^{-7} Mol/Liter) zurückgeführt werden müssen. In völlig reinem Wasser fallen die Meßdaten für saure, neutrale und alkalische Lösungen zusammen.

Es ist somit sehr wahrscheinlich, daß die Unterschiede

für Lösungen verschiedener Wasserstoffionenkonzentration (Abb. 10, 12, 13) ebenfalls auf dem Vorhandensein unkontrollierbarer grenzflächenaktiver Verunreinigungen beruhen, die sich trotz mehrfacher Destillation nicht beseitigen ließen. Wir sehen daher im Zusammenfallen der Meßpunkte für saure und neutrale Lösungen (Abb. 11 und 14) ein Kriterium für die Zuverlässigkeit der Meßdaten. In Fällen, in denen Unterschiede vorhanden sind, ist die unterste Kurve als zuverlässigste anzusehen, weil Verunreinigungen die Grenzflächenfluidität nur herabsetzen können.

b) Grenzflächenzähigkeit und Grenzflächenspannung.

Aus zuverlässigen Daten im Sinne der vorangehenden Erörterung wurden Werte für die Oberflächenzähigkeit gemäß Gleichung (6) berechnet, wenn die Unterschiede zur Festkugelkurve für $Re < 1$ hinreichend groß waren. Abb. 18 gibt die Ergebnisse für Cyclohexanol/Wasser, Abb. 20 für Paraffinöl/Acetophenon, Abb. 21 für Paraffinöl/Benzylalkohol und Abb. 22 für Paraffinöl/Nitromethan wieder. Die Abb. 17 und 19 stellen gemäß Gleichung (4) jeweils die Abhängigkeit des Verhältnisses der gemessenen Geschwindigkeit zu derjenigen, die der Tropfen hätte, wenn er sich starr, nach STOKES, bewegen würde, vom Tropfendurchmesser dar mit der oberen und unteren Schranke:

$$\frac{v}{v_{\text{Hadamard/Rybczynski}}} = \frac{3(\eta + \eta')}{2\eta + 3\eta'} \quad \text{b.z.w.} \quad \frac{v}{v_{\text{Stokes}}} = 1$$

Für die Systeme Cyclohexanon/0,1 n Schwefelsäure, Amylalkohol/0,1 n Schwefelsäure, Cyclohexanol/0,1 n Schwefelsäure, Paraffinöl/Nitromethan, Paraffinöl/Benzylalkohol, Paraffinöl/Acetophenon wurden die berechneten Grenzflächenzähigkeitswerte ϵ bereits in den Tabellen (Seite 21, 24, 26, 28) wiedergegeben.

Die Streuung der ϵ -Werte ist verhältnismässig groß. Dies ist jedoch bei dem fehleranfälligen Charakter der Bestimmungsgleichung für ϵ zu erwarten. Nach Gleichung (9) beträgt der relative Fehler in ϵ z. B. für Paraffinöl/Benzylalkohol (bei einem Tropfen mit $r = 0,168$ cm) $f_{\epsilon} = 54$ %, wenn für die relativen Fehler der maßgeblichen

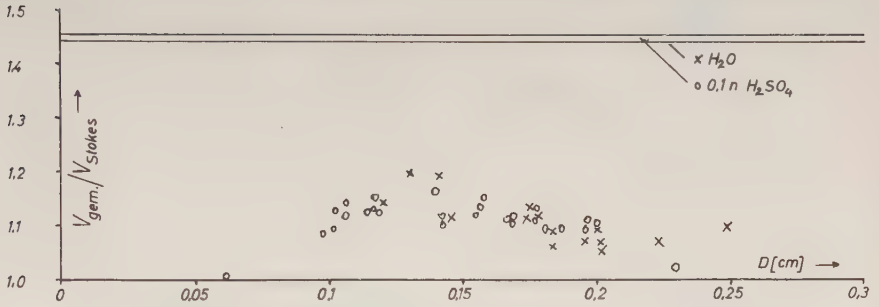


Abb. 17 Relative Geschwindigkeit von Wasser bzw. 0.1 n Schwefelsäure in Cyclohexanol.

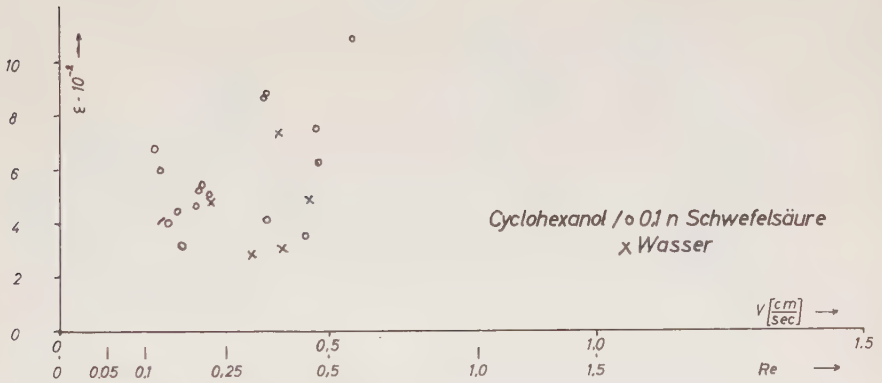
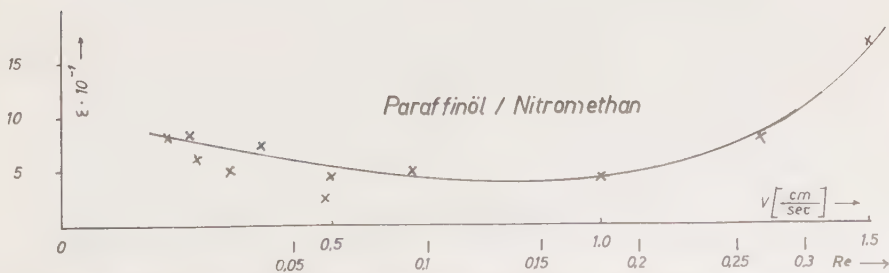
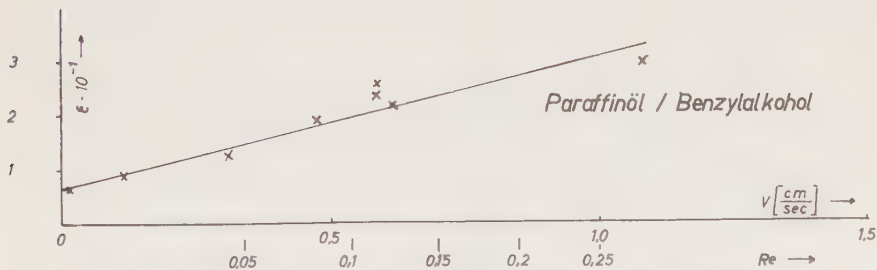
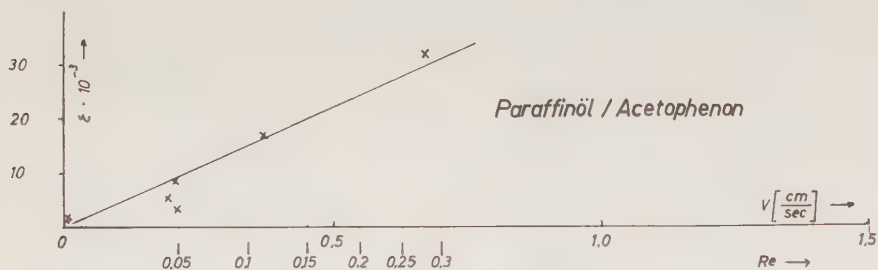
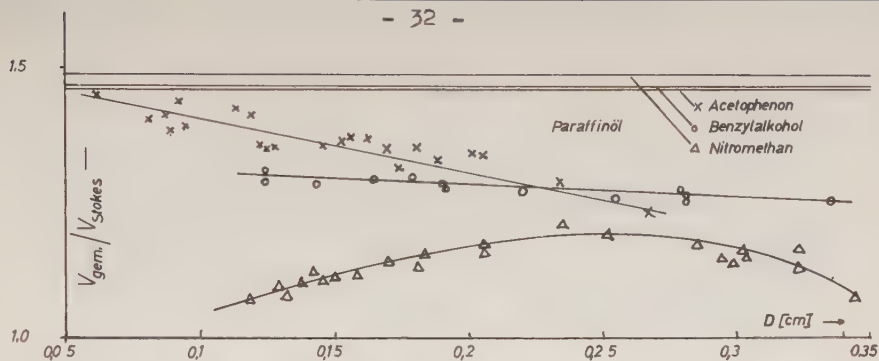


Abb. 18 "Zweite" Grenzflächenzähigkeit bei Cyclohexanol/Wasser bzw. 0.1 n Schwefelsäure.



Meßwerte r , η und v gesetzt wird: $f_r = 1\%$, $f_\eta = 1,5\%$, $f_v = 1,5\%$. Entsprechend gilt für Cyclohexanol/0,1 n Schwefelsäure, $r = 0,059$ cm, $f_s = 34\%$ oder für Paraffinöl/Acetophenon, $r = 0,047$ cm, $f_s = 97\%$. Da es - wie in der Einleitung hervorgehoben - bisher kaum Meßwerte für diese Größe gibt, wird man mit dieser Genauigkeit zufrieden sein.

In nachfolgender Tabelle sind die ϵ -Werte für vergleichbare Systeme (einschließlich des von SIENKNECHT gemessenen Wertes für Butanol/Wasser) der Größenordnung nach wiedergegeben. Parallel dazu die zugehörige Grenzflächen-spannung γ .

	ϵ [Poise cm]	γ [dyn/cm]
Cyclohexanon/Wasser	$3 \cdot 10^{-3}$	7,8
Amylalkohol/Wasser	$2 \cdot 10^{-3}$	4,8
Cyclohexanol/Wasser	$5 \cdot 10^{-2}$	3,1
Butylalkohol/Wasser	$2 \cdot 10^{-4}$	1,6
Nitromethan/Paraffinöl	$6 \cdot 10^{-1}$	13,7
Benzylalkohol/Paraffinöl	$2 \cdot 10^{-1}$	4,0
Acetophenon/Paraffinöl	$2 \cdot 10^{-3}$	1,4

BOND und NEWTON ¹¹⁾ haben, angeregt durch qualitative Ergebnisse für die Tropfenbewegung in Flüssigkeiten, geglaubt, durch dimensionsanalytische Argumentation einen von der Grenzflächenspannung abhängigen kritischen Tropfenradius r_{krit} angeben zu können, für den die Zirkulationsbewegung im Tropfen deutlich wird:

$$r_{krit.} = \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta \rho g}}$$

Dieser Zusammenhang enthält, wie leicht einzusehen, implicit die Feststellung, daß die Grenzflächenfluidität mit steigender Grenzflächenspannung abnimmt. KLEMM ²⁾ hat bereits darauf hingewiesen, daß diese Gleichung nicht richtig sein kann und daß allenfalls eine Parallelität zwischen Grenzflächenspannung und Grenzflächenfließverhalten besteht. - Daß die genannte Gleichung nicht zutrifft, geht aus den Daten obiger Tabelle hervor.

Immerhin ist innerhalb vergleichbarer Gruppen eine gewisse Parallelität zwischen Grenzflächenzähigkeit und Grenzflächenspannung festzustellen, wenn man von dem System Cyclohexanol/Wasser absieht, das bei geringerer Grenzflächenspannung eine um eine Größenordnung höhere Grenzflächenzähigkeit hat als die Systeme Cyclohexanon/Wasser und Amylalkohol/Wasser.

Nimmt man an, daß der in Gleichung (5) auftretende zweidimensionale Elastizitätsmodul α für alle Grenzflächen der Größenordnung nach den selben Wert hat (eine Annahme, die sich beim dreidimensionalen Fließverhalten bewährt), so stellen die Verhältnisse der Grenzflächenzähigkeiten zu einer ausgesuchten Grenzflächenzähigkeit ein ungefähres relatives Maß der Relaxationszeiten für die Einstellung des Grenzflächengleichgewichtes dar. Die genannte Parallelität bedeutet dann, daß die Geschwindigkeit der Grenzflächengleichgewichtseinstellung im allgemeinen um so geringer, je höher die Grenzflächenspannung ist. Da die Grenzflächenspannung ein rohes Maß für die Verschiedenheit der aneinandergrenzenden Phasen darstellt, ist für vergleichbare Systeme der Schluß möglich, daß eine Grenzfläche mit steigender Grenzflächenspannung meist eine gegenüber dem Flüssigkeitsinneren zunehmend ausgeprägte Gleichgewichtsstruktur besitzt (da für diese eine jeweils höhere Einstellzeit plausibel ist).

Die mitgeteilten Grenzflächenzähigkeiten werden mit Zähigkeitswerten dreidimensionaler Systeme vergleichbar, wenn man sie durch die Dicke der Grenzschicht (Schichtdicke, für die sich die Grenzschicht merklich vom Flüssigkeitsinneren unterscheidet), normalerweise höchstens 10^{-6} cm, dividiert. Für Cyclohexanol/Wasser ergibt sich auf diese Weise z. B. der Wert von $5 \cdot 10^4$ Poise.

c) Nichtnewton'sches Fließverhalten.

Die Abb. 20 - 22 lassen einen Gang der Grenzflächenzähigkeit mit der Tropfengeschwindigkeit außerhalb der Fehlerschwankung erkennen. - SIENKNECHT hat ein entsprechendes Verhalten bereits bei Butanol/Wasser-Systemen

gefunden. - Das bedeutet, daß nichtnewton'sches Fließverhalten vorliegt (für die Abb. 20 und 21 vom durch die untere Kurve der Abb. 2 gekennzeichneten Typ). Streng genommen dürfte demnach die auf der Voraussetzung NEWTON'schen Fließverhaltens beruhende BOUSSINESQ'sche Gleichung (1) hier garnicht zur Berechnung von Grenzflächenzähigkeiten herangezogen werden. Da jedoch die Kenntnis der Größenordnungen für zweite Grenzflächenzähigkeitswerte bereits von Interesse ist, dürfte dieses Bestimmungsverfahren für eine erste Orientierung ausreichend sein. Im übrigen ist die Feststellung nichtnewton'schen Verhaltens bei einfachen Systemen bereits für sich interessant. Bei der bekannten Schwierigkeit, organische Substanzen zu reinigen, ist allerdings das Vorhandensein grenzflächenaktiver Verunreinigungen als Ursache für dieses Verhalten nicht auszuschließen. Es müßte sich dabei jedoch um sehr spezielle Stoffe handeln, da die Empfindlichkeit gegen derartige Verunreinigungen charakteristisch für die Grenzflächen wässriger Phasen und nicht für solche aus Öl/Öl ist.

Literaturverzeichnis

- 1) Siehe z. B.
JOLY M. Kolloid Z. 126, 35 (1951)
- 2) KLEMM A., Phys. Zeitschr. 39, 783 (1938)
- 3) SIENKNECHT J., Diss. Univ. München (1958)
- 4) BOUSSINESQ J., Ann. Chim. phys. 29, 349 (1913)
- 5) HADAMARD J.C.R., Acad. Sci., Paris 152, 1735 (1911)
RYBCZYNSKI W., Bull. Acad. Sci. Cracovie A 40 (1911)
- 6) MUTTER E., Die Grundlagen der Photographie
Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH,
Berlin-Borsigwalde 309 (1958)
- 7) SCHWINDT W., Diss. Univ. München (1956)
- 8) Taschenbuch für Chemiker u. Physiker von D'Ans-Lax
Springer-Verlag, Berlin
Handbook of Chemistry and Physics
Chemical Rubber Publishing Co.
34th Edition 1952 - 1953
Critical Tables IV, 436; VII, 210
- 9) SCHWINDT W., und
STUKE B., Proceedings of the Second Inter-
national Congress of Surface Activity
Butterworth Scientific Publications,
London
- 10) SCHIMMER Dipl.-Arb. Univ. München
(noch nicht abgeschlossen)
- 11) BOND W. N., und
NEWTON D. A., Phil. Mag. (7) 5, 794 (1928)

Lebenslauf

=====

Hans Friedrich RUSSLER

Geboren: 12. Dezember 1925
Eltern: Bankangestellter Hans Rußler
Frau Anna Rußler, geb. Hauser
Ehefrau: Tilde Rußler, geb. Schuster
Eheschließung 26. 8. 1947,
1 Kind, geb. 12. 8. 1956

Schulausbildung:

1932 - 1938 Volksschule an der Simmernstr., München
1938 - 1942 Städt. Höhere Handelsschule an der
Wilhelmstr., München (Obersekundareife)
1942 - 1943 Oberschule für Knaben an der Klenzestr.,
München (Reifevermerk)

Militärzeit:

1943 - 1945 Militärdienst bei den Gebirgsjägern

Universitätsausbildung:

1946 II. Förderungskurs der Universität
München
1946 - 1947 Chemiestudium an der Universität München
und
1951 - 1958
Juni 1953 Vordiplom
Februar 1956 Diplomarbeit am Physikalisch-Chemischen
bis Juli 1958 Institut der Universität München unter
Herrn Priv.-Doz. Dr. B. Stuke.
Thema: Versuche zur anormalen Aushärtung
von Metallegierungen.
Juli 1958 Diplom für Chemie
Juli 1958 bis Doktorarbeit am Physikalisch-Chemischen
Dezember 1959 Institut der Universität München unter
Herrn Priv.-Doz. Dr. B. Stuke.
Mai 1957 bis Im Physikalisch-Chemischen Praktikum tätig
Dezember 1959

Berufliche Tätigkeit:

1947 - 1950 Selbständig
1. Jan. 1960 Assistent des Leiters der Zentralprüfstelle
der Firma Perutz Photowerke GmbH., München

